

La transition agro-écologique des agricultures du Sud

F.-X. Côte, E. Poirier-Magona,
S. Perret, P. Roudier,
B. Rapidel, M.-C. Thirion,
éditeurs



Quæ éditions

L'agro-écologie à Madagascar : de la plante au paysage

Krishna Naudin, Patrice Autfray, Julie Dusserre, Éric Penot, Louis-Marie Raboin, Tahina Raharison, Jacqueline Rakotoarisoa, Alain Ramanantsoanirina, Meva Tahiry Randrianjafizanaka, Laingo Irintsoa Rasolofo, Harinjaka Raveloson, Mamy Razafimahatratra, Paulo Salgado, Mathilde Sester, Kirsten Vom Brocke, Éric Scopel

Introduction

Contexte et problématique

La région du Vakinankaratra, au centre de l'île de Madagascar, est à cheval sur deux zones biogéographiques qui présentent des différences physiques et humaines propres : les Hautes Terres et le Moyen-Ouest (fig. 2.1). Les équipes de recherche et de développement localisées à Antsirabe ont été sollicitées depuis plus de 30 ans afin d'y accompagner une intensification durable de la production agricole. Pour cela, différentes solutions agro-écologiques ont été prospectées, afin de mobiliser au mieux les ressources naturelles disponibles et dans un souci de cohérence à l'échelle des exploitations dans leur diversité. Des innovations plus ou moins complexes, combinant parfois différentes options, ont été envisagées en fonction des contextes.



Figure 2.1. Localisation des Hautes Terres et du Moyen-Ouest à l'intérieur de la région du Vakinankaratra à Madagascar (d'après carte Wikipédia - Privatemajory CC BY-SA).

La partie du Vakinankaratra qui appartient aux Hautes Terres est située à une altitude autour de 1 400 m, sa pluviométrie annuelle est de 1 300 mm en moyenne. C'est une zone de peuplement ancien, plus de 2 000 ans, par conséquent la densité de population y est importante (supérieure à 120 hab./km²). Les exploitations se caractérisent par une petite taille (0,5 ha en moyenne), des systèmes de production intensifs en travail, une très faible utilisation d'intrants agricoles et la pratique des cultures de contre-saison en zone irriguée quand cela est possible. Les zones irriguées et les zones en agriculture pluviale sur les *tanety*^[3] (collines) sont déjà occupées. Les systèmes de culture dans les bas-fonds aménagés sont basés

sur le riz irrigué en saison des pluies avec des rendements en riz autour de 3 t / ha, suivis en contre-saison de cultures maraîchères (pomme de terre, tomate, carotte) et/ou de fourrages pour les éleveurs laitiers. En ce qui concerne les systèmes de culture sur *tanety*, le riz pluvial (en essor), le maïs, la patate douce, le haricot, le pois de terre (*Vigna subterranea*, *voandzou*), le manioc, la pomme de terre et l'arachide sont les principales productions. Face à la croissance démographique, le riz pluvial est devenu une composante extrêmement importante dans la production rizicole totale qui constitue la base de l'alimentation des Malgaches. L'accroissement de la production de riz pluvial est liée à l'adoption d'une variété népalaise particulièrement adaptée aux conditions locales, et de variétés issues de la recherche locale (Penot *et al.*, 2016 ; Raboin *et al.*, 2014). L'intégration agriculture-élevage est particulièrement importante et le fumier reste la première source de fertilisation pour les cultures. L'élevage est également une des possibilités locales de valorisation des ressources végétales et d'augmentation du revenu. La problématique pour ces agriculteurs dont les surfaces cultivables sont limitées est d'intensifier la production par unité de surface alors qu'ils n'ont que très peu accès à des moyens d'intensification classiques (engrais, mécanisation, pesticides), le tout dans un milieu fragile et avec des pentes assez fortes.

Le moyen-ouest de Madagascar est situé à une altitude plus basse, autour de 800 m. Les sols sont pauvres sur le plan chimique (sols ferralitiques désaturés) mais bénéficient de conditions physiques correctes. Le climat y est de type tropical avec 1 000 à 1 500 mm/an de précipitations répartis sur quatre à cinq mois. Ce sont des zones dont la colonisation est plus récente (dans les années 1960), par conséquent la densité de population y est plus faible (30 à 40 hab./km²) et les superficies des exploitations sont plus importantes que sur les Hautes Terres (Penot *et al.*, 2016). Il s'agit encore d'une zone de front pionnier en cours de stabilisation. Les cultures principales sont le riz pluvial, le maïs et le manioc sur les *tanety*, et le riz irrigué dans les bas-fonds. L'élevage y est très important en raison des espaces de pâturage naturels étendus qui subsistent à une distance relativement proche des grands marchés des Hautes Terres. Dans cette région également, les bas-fonds, même si leur surface est moins étendue, ont été cultivés en premier et les paysans doivent maintenant cultiver de manière de plus en plus régulière les *tanety*. Mais en culture pluviale, la région du Moyen-Ouest se distingue par la présence d'une plante parasite dommageable aux céréales : *Striga asiatica*. Les variétés de riz et les systèmes de culture qui sont mis au point visent donc, outre à s'adapter à

une faible fertilité, à réduire l'incidence de *S. asiatica*.

Les acteurs et leurs rôles

Pour répondre aux enjeux présentés ci-dessus, les structures de développement malgaches et le Cirad travaillent conjointement depuis bientôt 35 ans. Ainsi, l'ONG Tafa, créée en 1995, a eu comme objectif de proposer une alternative au modèle d'intensification basé sur le travail du sol alors promu à Madagascar. À partir des premières expériences mises en place en 1991 sur le site d'Andranomanelatra (région d'Antsirabe) et avec l'appui de L. Séguy du Cirad, cette ONG a assuré la création de nouveaux systèmes de culture en agriculture de conservation et leur diffusion en s'appuyant sur un nombre de sites-vitrines répartis sur les principales régions agro-écologiques du pays. Le travail de promotion de l'agriculture de conservation a été étendu à l'échelle nationale par la création en 2002 du groupement du Semis direct à Madagascar (GSDM), en lien avec d'autres partenaires nationaux et internationaux (Compagnie Bas-Rhône Languedoc [BRL], Agrisud, Groupe de recherche et d'échange technologique [Gret]). Petit à petit, d'autres solutions techniques ont également été intégrées à leur travail de vulgarisation (agroforesterie, lombricompost). L'AFD a soutenu ces activités au travers de divers projets nationaux et programmes internationaux. Elle a notamment soutenu de 2006 à 2012 un programme de développement « Bassin versant périmètre irrigué » qui avait pour objectif l'augmentation durable des revenus des agriculteurs tout en préservant l'environnement à travers, entre autres, la promotion de l'agro-écologie. En parallèle de ces actions axées sur le développement, le Fofifa (Centre national de la recherche appliquée au développement rural, Madagascar), l'université d'Antananarivo et le Cirad ont créé le collectif « Systèmes de culture et rizicultures durables », fin 2001, pour assurer l'accompagnement agronomique et économique de l'augmentation des surfaces de riziculture pluviale. Ce collectif a centré son travail sur deux innovations majeures : d'une part, la création et la diffusion des variétés de riz pluvial d'altitude issues du programme de création variétale lancé au milieu des années 1980 par le Fofifa et le Cirad ; et d'autre part, la création et l'évaluation des systèmes de culture en agriculture de conservation ou systèmes de culture sur couverture végétale, diffusés par l'ONG Tafa et le Cirad depuis le début des années 1990. Le collectif franco-malgache de recherche est passé par différents statuts de collaboration scientifique, élargissant petit à petit ces

thématiques de recherche et son cercle partenarial. Ainsi, le dispositif de recherche en partenariat actuel « Systèmes de production d'altitude et durabilité » associait en 2013 également l'Institut de recherche pour le développement (IRD), Fifamanor et AfricaRiceCenter.

Cadre conceptuel

Wezel *et al.* (2014) proposent de classer les innovations agro-écologiques en fonction des mécanismes qu'elles mobilisent et de la profondeur des changements requis : augmentation de l'efficacité, substitution des intrants externes et refonte des systèmes (*redesign*). Sur les Hautes Terres et dans le Moyen-Ouest, les paysans utilisent peu d'intrants chimiques. Donc logiquement les solutions proposées se basent peu sur les mécanismes de substitution mais plutôt sur l'augmentation de l'efficacité et la refonte des systèmes.

Nous présenterons tout d'abord deux exemples d'augmentation de l'efficacité à l'échelle de la plante, en montrant comment la sélection variétale s'est orientée vers des variétés naturellement résistantes à une maladie fongique (la pyriculariose), valorisant mieux l'azote présent dans le sol et produisant plus de biomasse végétative, et ainsi plus concurrentielles vis-à-vis des adventices. Nous présenterons également un exemple d'augmentation de l'efficacité, à l'échelle intermédiaire du système d'élevage, à travers le processus de fabrication du fumier, qui améliore le recyclage des nutriments et augmente le rendement des cultures. Nous verrons quelle répercussion cette augmentation de l'efficacité peut avoir à l'échelle de l'exploitation. Nous présenterons ensuite des exemples de refonte du mode de gestion des sols et des cultures, à l'échelle des systèmes de culture, basés sur des nouvelles variétés de riz pluvial et sur l'agriculture de conservation. Cette dernière étant un exemple de modifications agro-écologiques plus profondes d'un point de vue systémique et du point de vue des mécanismes mobilisés.

Deux innovations basées sur l'augmentation de l'efficacité

Une sélection variétale adaptée à une faible fertilité

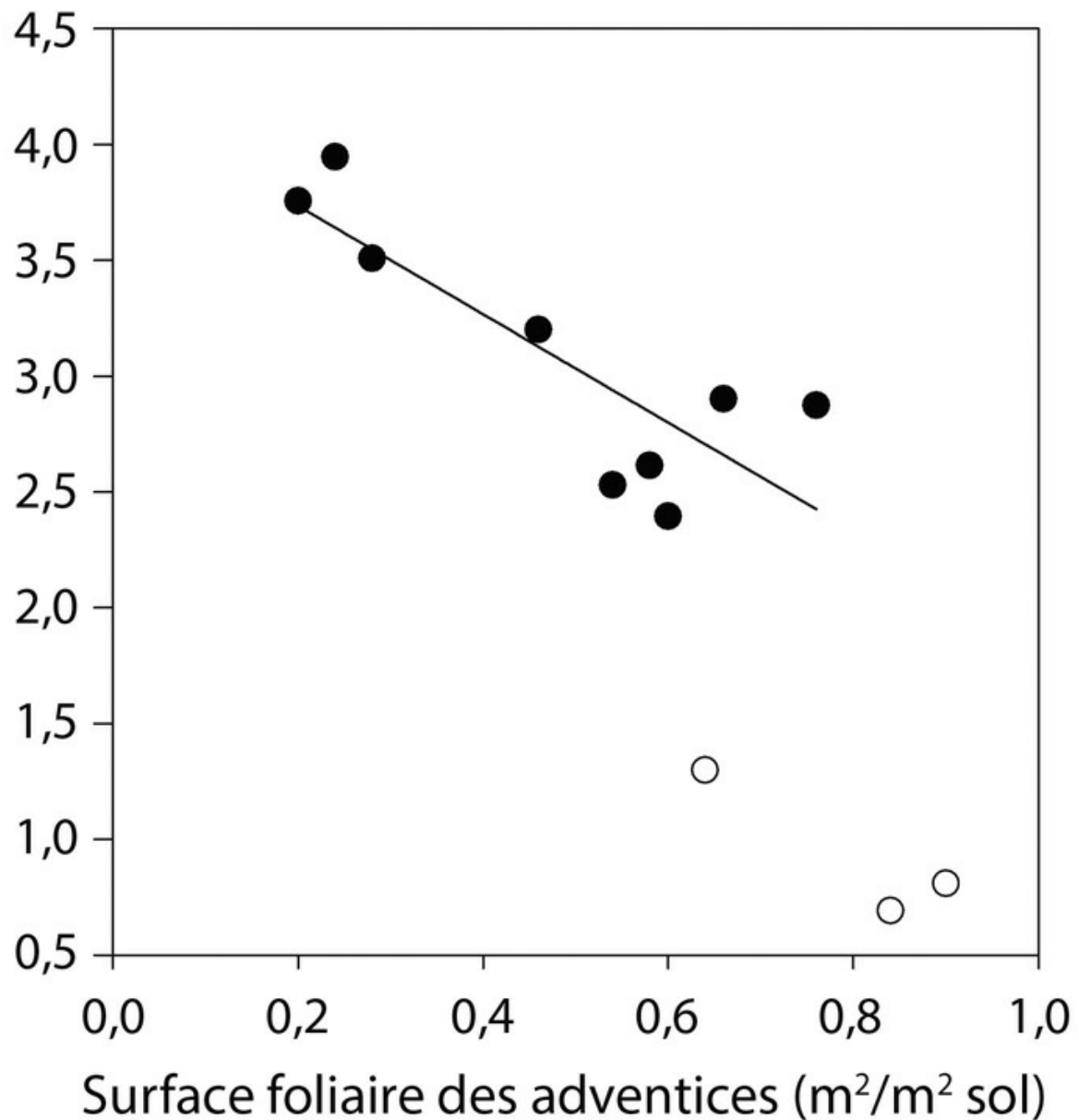
des sols et aux bioagresseurs

Des plantes plus adaptées à une faible fertilité et aux maladies

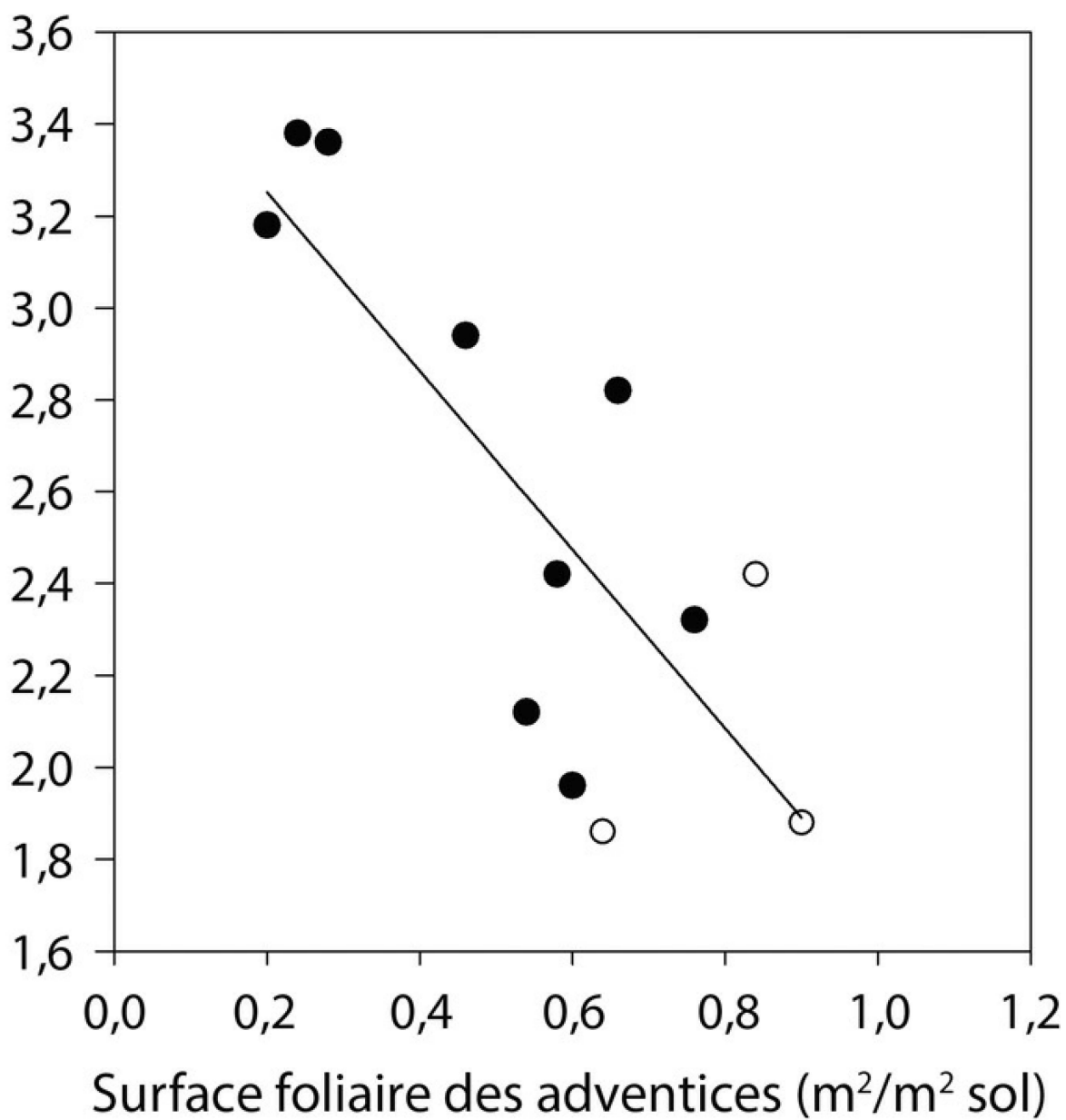
Le programme Fofifa-Cirad d'amélioration génétique du riz pluvial d'altitude a été lancé en 1984 (Raboin *et al.*, 2013). Il a pour objectif de sélectionner des variétés adaptées au contexte biophysique des Hautes Terres (froid, pression des maladies, faible fertilité) mais aussi au contexte socio-économique des exploitations (peu de moyens pour acheter des intrants chimiques). Dans les conditions froides d'altitude, une forte corrélation a été mise en évidence entre le développement végétatif des variétés de riz pluvial, mesuré en termes de surface foliaire, et le rendement en grain (fig. 2.2). Une corrélation a aussi été montrée entre le rendement en grain et la longueur du cycle. Dans des conditions sans fertilisation minérale, les variétés à cycle long et à fort développement végétatif accumulent au cours du temps plus d'azote provenant de la minéralisation, ce qui se traduit par un rendement plus élevé. Toutefois, l'allongement du cycle ne peut dépasser une certaine limite à cause des risques de froid et de stérilité qui augmentent lorsque l'on s'approche de la fin de la saison des pluies. De plus, les agriculteurs apprécient des variétés relativement précoces afin de raccourcir la période de soudure. Enfin, le fort développement végétatif permet au riz d'être plus compétitif vis-à-vis des adventices (fig. 2.2 ; Raboin *et al.*, 2014). Il est aussi nécessaire de sélectionner des variétés qui soient résistantes à la pyriculariose, une maladie fongique très présente, qui peut entraîner la perte totale de récolte dans les cas les plus graves (Pennisi, 2010), et contre laquelle la lutte chimique serait trop onéreuse. Il faut pour cela maintenir, dans le processus de sélection, des conditions épidémiologiques favorables à la maladie en apportant des fertilisants azotés et en utilisant des bordures de parcelles infestées constituées de variétés très sensibles. Elles facilitent la multiplication locale de la pyriculariose pour soumettre les nouvelles variétés sélectionnées à une forte pression de la maladie. Il a donc fallu trouver un compromis pour concilier sélection dans les conditions de « faibles intrants » et maintien d'une pression de sélection pour la résistance à la pyriculariose. L'utilisation des intrants a été fortement réduite au cours de la sélection généalogique sans les supprimer totalement. De plus, les phases finales de la sélection au cours desquelles

le rendement est évalué (essais variétaux) ont été dédoublées pour appliquer deux niveaux de fertilisation : sans ou avec recours aux intrants chimiques.

Rendement en grain (t/ha)



Surface foliaire des variétés de riz



Rendement en grain (t/ha)

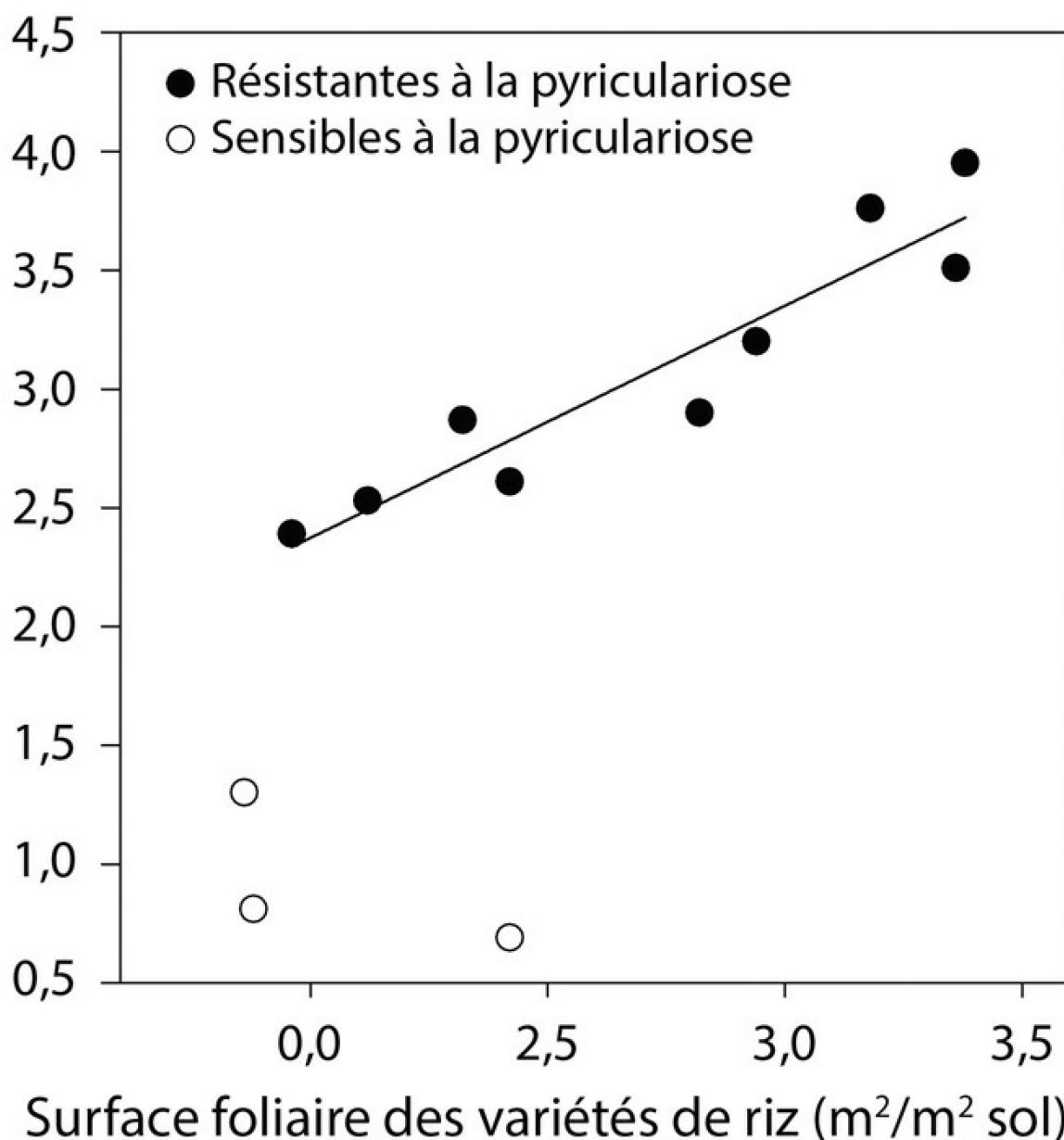


Figure 2.2. Relations entre rendement en grain, surface foliaire des adventices et surface foliaire des variétés observées à 1 650 m d'altitude sur un panel de 12 variétés de riz pluvial (Raboin *et al.*, 2014).

Conséquences sur les systèmes de production et le paysage

Plus de 20 variétés de riz pluvial d'altitude ont été proposées par la recherche aux paysans depuis 1994. L'expansion de la riziculture pluviale

jusqu'à plus de 1 800 m d'altitude a été rapide alors qu'elle n'était pas possible auparavant à ces altitudes faute de variétés adaptées. Ainsi, entre 2005 et 2011, le pourcentage des exploitations du Vakinankaratra situées au-dessus de 1250 m qui cultivent du riz pluvial est passé de 32 à 71 % (Raboin *et al.*, 2014). L'amélioration de l'efficience à l'échelle des plants de riz a entraîné des changements dans les systèmes de culture pratiqués au sein des exploitations et une modification visible à l'échelle du paysage. Une évaluation participative de l'impact du riz pluvial d'altitude a été réalisée en 2015 et a mis en exergue son importance dans les stratégies paysannes centrées sur la sécurité alimentaire. Ces variétés de riz ont eu un impact notable sur l'amélioration de l'autosuffisance en riz (la période de soudure a été réduite de 3,7 mois pour 112 exploitations enquêtées) et sur le bien-être des ménages d'agriculteurs de la région Vakinankaratra (Breumier *et al.*, 2018).

Réduction des pertes en nutriments à l'échelle de l'exploitation

Les changements techniques dans le système d'élevage

L'utilisation des effluents d'élevage pour l'entretien de la fertilité des sols cultivés constitue la principale source fertilisante utilisée par les paysans. Toutefois, la valeur fertilisante du fumier varie de manière importante entre les exploitations. Ainsi des mesures auprès de 60 exploitants ont montré que la teneur en azote du fumier pouvait varier de 0,6 à 2,6 % (Salgado *et al.*, 2014). Les chercheurs malgaches associés au Cirad ont travaillé à mettre en évidence les principales sources de variabilité de sa qualité et à mesurer l'impact du fumier amélioré sur le rendement des cultures.

Sur la base de ces observations, les recommandations techniques pour améliorer la qualité du fumier sont de trois types : l'adjonction de paille de riz aux déjections, le pavage du sol des étables afin de limiter les pertes par infiltration, la gestion adéquate et la protection du fumier en attente d'être épandu sur le champ.

Les modes de gestion et de stockage influent fortement sur sa teneur en azote (Andriarimalala *et al.*, 2013). Il est important que les matières

végétales riches en carbone (pailles, feuilles mortes ou petites branches) soient déposées en bas du tas et que celles riches en azote (jeunes feuilles, pelures et surtout résidus animaux comme les déjections, les purins ou autres) soient déposées au-dessus. Cette technique favorise la dégradation par les micro-organismes qui utilisent l'azote des couches supérieures pour décomposer plus rapidement les parties riches en carbone des couches inférieures (Rabenandro *et al.*, 2009). De plus, il est préférable de disposer le tas de fumier dans des fosses à fumier couvertes (fig. 2.3) par un toit car cela permet de limiter les pertes de nutriments par lessivage lors des pluies ou par volatilisation due aux fortes températures (Salgado *et al.*, 2012).

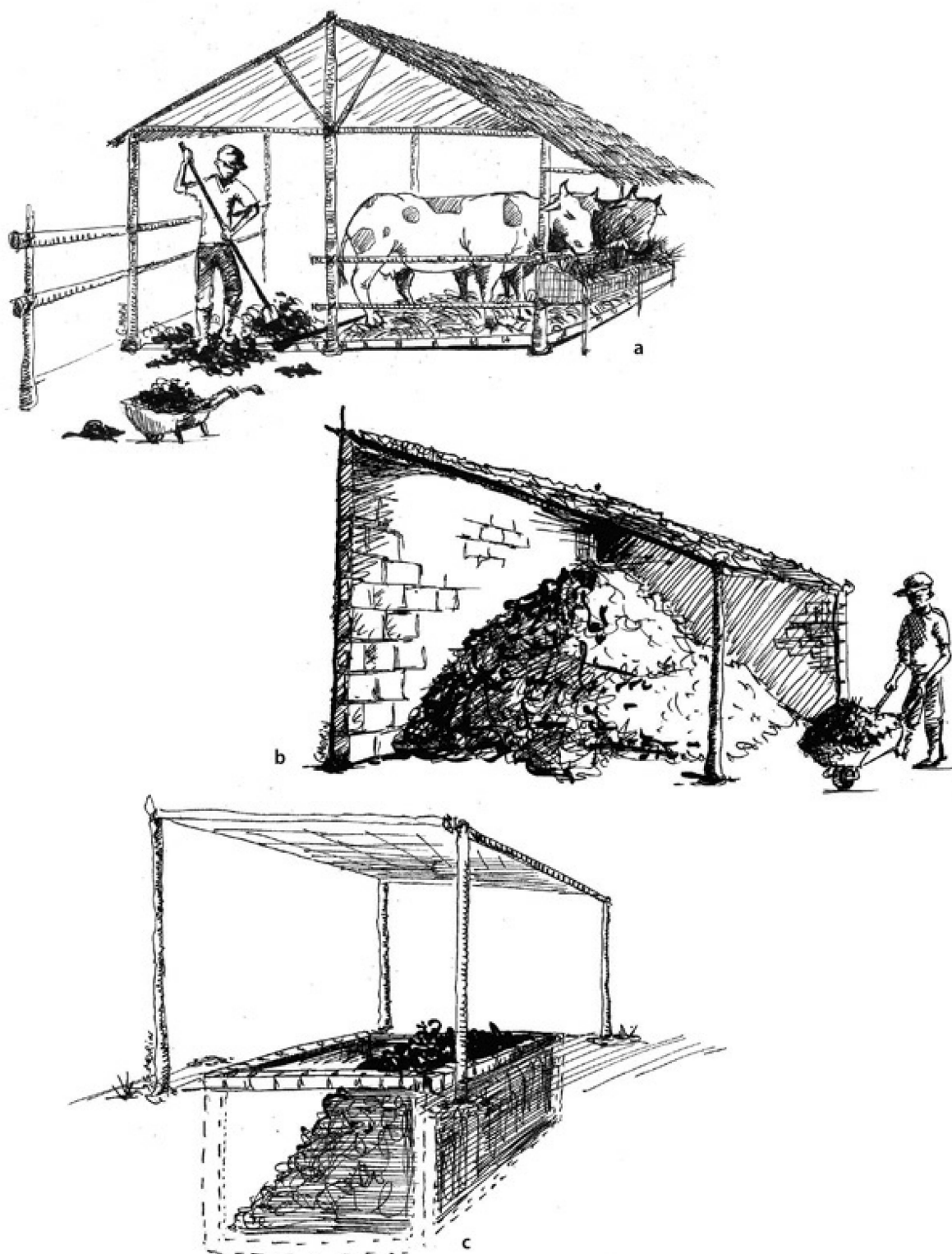


Figure 2.3. Pratiques d'amélioration du fumier : animaux dans un parc avec toit (a) ; mélange du fumier avec d'autres sources de matières organiques de l'exploitation (b) ; fumier couvert par un toit et disposé dans une fosse (c). Salgado *et al.* (2012), dessins G. Morin.

L'impact sur les systèmes de cultures

Les paysans disposent souvent d'une quantité de fumure organique faible par rapport aux surfaces de leurs parcelles et à leurs besoins. Ils choisissent par conséquent de fertiliser en premier les cultures qui apportent les revenus les plus importants à l'hectare. Il s'agit le plus souvent des cultures maraîchères en contre-saison sur les rizières. Les parcelles pluviales (*tanety*), les moins fertiles, sont pour cette raison les moins fertilisées. La diminution des pertes en nutriments par l'amélioration du processus de fabrication du fumier est donc une voie de choix pour améliorer les ressources limitées de l'exploitation et ouvrir d'autres voies de valorisation. Ainsi, l'utilisation du fumier amélioré a été comparée à celle du fumier conventionnel sur le rendement en riz pluvial dans deux parcelles côte à côte, chez 19 paysans en 2014 et 2015 (fig. 2.4). Les deux années, le rendement en riz pluvial a été plus élevé d'environ 1 t/ha avec le fumier amélioré. Dans ce cas, le fumier amélioré était environ deux fois plus riche en éléments nutritifs avec 26 g N/kg MS (d'azote par kilogramme de matière sèche) et 5,5 g P/kg MS (de phosphore par kilogramme de matière sèche) contre 13 g N/kg MS et 3,6 g P/kg MS pour le fumier conventionnel.

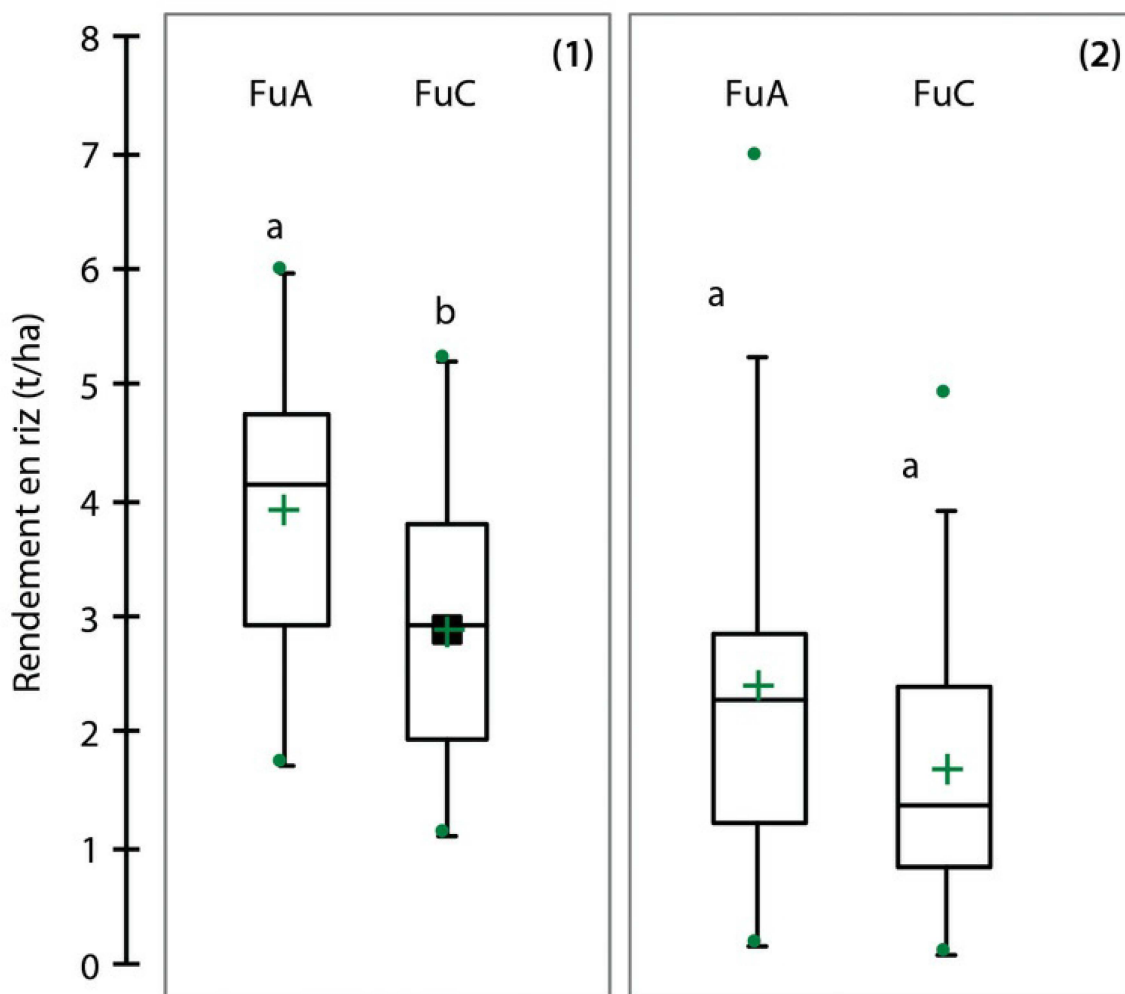


Figure 2.4. Rendement en grain du riz pluvial en 2014 (1) et 2015 (2) en fonction du type de fumier utilisé (Rasolofo, 2017).

FuA : fumier amélioré ; FuC : fumier conventionnel. Les lettres correspondent à la différence des traitements à l'intérieur d'une année, parcelles test de Tukey HSD, $\alpha = 0,05$. N = 19 parcelles paysannes par an, variété 'Chhomrong Dhan', même source de fumier amélioré pour toutes les parcelles.

L'impact à l'échelle de l'exploitation encore peu étudié

Les travaux sur l'impact socio-économique de l'amélioration du fumier ont montré que l'adoption de ces pratiques ne se traduit pas par une augmentation significative du coût de production du fumier, malgré les investissements et le travail supplémentaires.

L'augmentation de l'efficacité dans l'utilisation du fumier vise à accroître

la production végétale, tout en valorisant au mieux les ressources de l'exploitation par la réduction des pertes de nutriments, à l'échelle du système de production. Du point de vue des paysans, cette solution technique n'est pas en contradiction avec l'utilisation de fertilisants minéraux. La plupart connaissent bien les effets synergiques entre les fumures minérale et organique. Ils privilégient donc des solutions d'intensification écologique, au sens de Griffon (2013), combinant solution agro-écologique et intrants minéraux. Toutefois, comme d'autres techniques agro-écologiques, la contrepartie est que cela entraîne plus de travail et de technicité, avec des conséquences sur l'organisation du temps investi, soit sur l'aménagement des espaces de gestion des fumiers, soit en apprentissage. Les motivations amenant les producteurs à cet investissement restent à approfondir.

Les innovations basées sur la refonte des systèmes

Nous présenterons ici deux exemples de refonte des systèmes de culture, d'abord à travers la diversification intraspécifique (mélange de variétés) pour lutter contre une maladie du riz à différentes échelles, puis la diversification supraspécifique (différentes espèces de plantes) associée à des changements de gestion de travail du sol (agriculture de conservation) pour améliorer la fertilité et lutter contre les bioagresseurs (adventices).

Mélanges de variétés pour lutter contre la pyriculariose

À l'échelle de la parcelle

La pyriculariose, déjà depuis longtemps au cœur du programme de sélection pour le riz pluvial, est une maladie causée par le champignon pathogène *Magnaporthe oryzae* (Ou, 1985). Les symptômes apparaissent en premier lieu sur les feuilles, ce qui réduit la surface foliaire utile à la photosynthèse, puis, au niveau des tiges paniculaires, les nécroses vont empêcher le remplissage des grains (fig. 2.5a). Les premières variétés de riz pluvial adaptées à l'altitude ont été rapidement attaquées et les variétés

plus récentes, désormais sélectionnées sous pression de pyriculariose, sont beaucoup plus tolérantes, mais le pathogène s'adapte très vite et les risques de contournement des résistances sont importants.

Plusieurs voies ont été explorées pour limiter la pression de pyriculariose sur le riz pluvial et retarder le risque de contournement des résistances des nouvelles variétés. La première est l'utilisation de variétés en mélange, dispositif qui a fait ses preuves dans de nombreux systèmes plante-pathogène. Les chercheurs ont testé l'impact de la pyriculariose sur une variété très sensible cultivée pure ou en mélange avec une variété résistante (Raboin *et al.*, 2012 ; Raveloson *et al.*, 2016 ; fig. 2.5b). Les mélanges ont permis de réduire significativement la sévérité de la maladie sur les variétés sensibles. Le déploiement de ce type de mélange pourrait permettre de continuer à cultiver certaines variétés sensibles particulièrement prisées par les consommateurs même en cas de pression de la maladie. Les effets des mélanges variétaux sur la dynamique des épidémies relèvent de plusieurs mécanismes : un effet de dilution, une barrière physique à la propagation des spores entre les plantes sensibles, et la résistance induite qui viendrait d'interactions entre plantes.



Figure 2.5a. Symptôme typique de pyriculariose paniculaire (panicule stérile). © Mathilde Sester / Cirad.

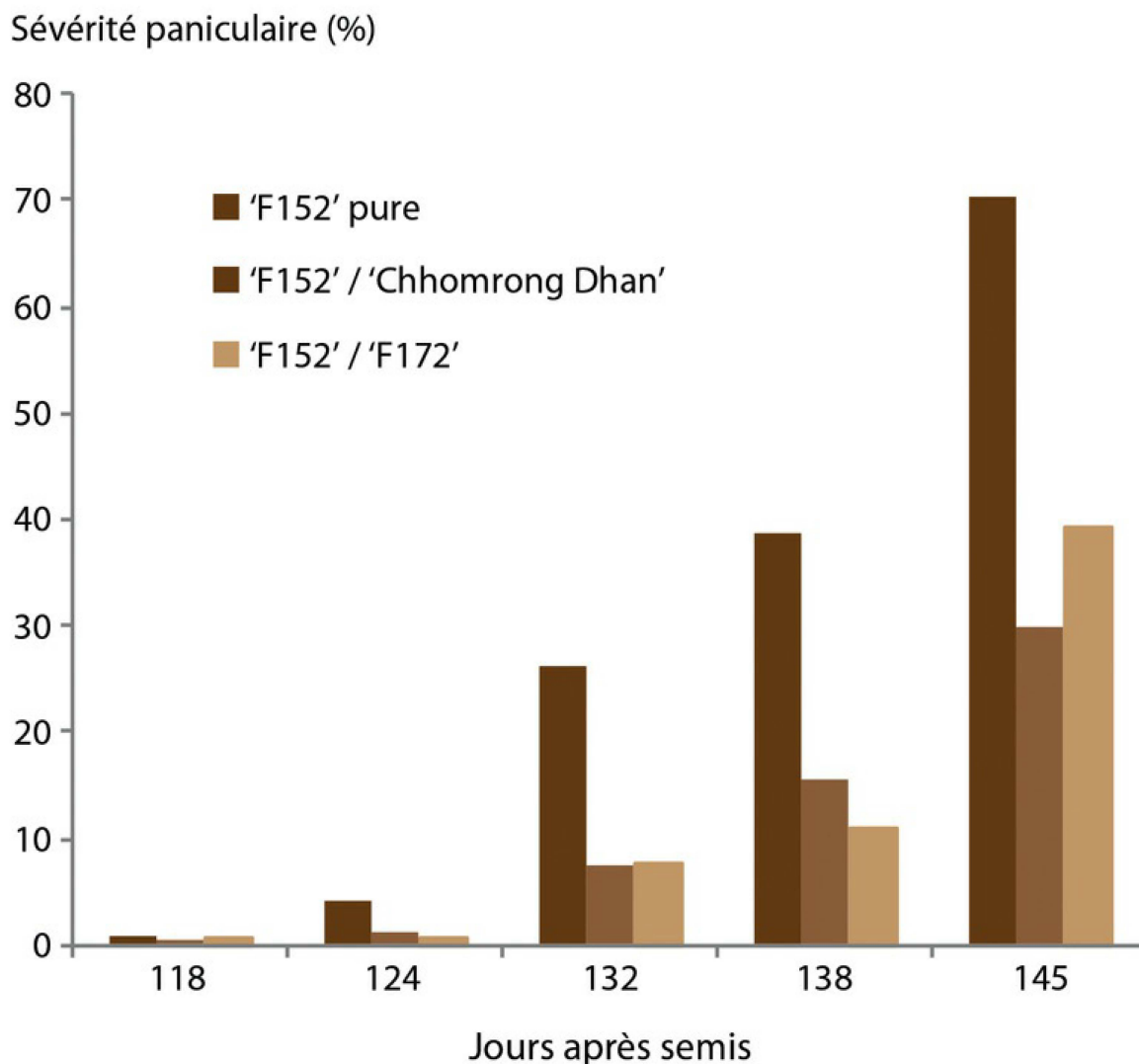


Figure 2.5.b. Évolution du pourcentage de grains attaqués par la pyriculariose sur la variété 'F152' (sensible) cultivée pure ou en mélange (une ligne de sensible pour quatre lignes de résistantes) avec les variétés 'Chhomrong Dhan' (tolérante) ou 'F172' (résistante), en 2012.

Les mélanges variétaux, comme la sélection de variétés, permettent aux paysans de continuer à cultiver du riz pluvial sans avoir à utiliser de fongicides pour lutter contre la pyriculariose.

À l'échelle du paysage

La pression de pyriculariose en culture pluviale a fortement diminué en conditions paysannes depuis la diffusion massive d'une variété tolérante ('Chhomrong Dhan'). Cependant, cette situation semble fragile si l'agent

pathogène s'adaptait à cette variété. Un modèle a été programmé en langage Ocelet (Degenne et Lo Seen, 2016) pour mettre en évidence l'impact de la gestion agronomique de chaque parcelle et de la diversité variétale à l'échelle du paysage sur le risque de propagation de la maladie (Raveloson *et al.*, 2016 ; Sester *et al.*, 2016). Ce modèle permet notamment de comparer un paysage cultivé avec une ou deux variétés de riz pluvial (exemple de résultat après cinq ans de simulation, fig. 2.6). Le nombre de parcelles touchées et la sévérité de la maladie augmentent beaucoup plus rapidement si une seule variété est cultivée uniformément dans le paysage.

Ces travaux montrent que les solutions de lutte agro-écologique contre les bioagresseurs font souvent appel à des solutions à des échelles au-delà de la simple plante que l'on cherche à protéger.





Figure 2.6. Simulations de cinq ans de l'attaque de pyriculariose sur un paysage agricole malgache dans lequel toutes les parcelles sont cultivées en riz chaque année.

a : une variété en rizière et deux variétés. b : une variété en rizière et une variété en pluvial.

L'infestation initiale est identique dans les deux cas. La hauteur des pavés colorés est proportionnelle au niveau d'attaque par la maladie.

Gestion des sols et diversification interspécifique : l'agriculture de conservation

En réponse à l'expansion des cultures pluviales sur les collines dans la région des Hautes Terres, des systèmes de culture alternatifs basés sur l'agriculture de conservation (fondée sur trois principes : non-labour, maintien d'un couvert permanent du sol, rotation des cultures) ont été recommandés pour réduire l'érosion et améliorer la durabilité de ces systèmes de culture (Husson *et al.*, 2013). L'agriculture de conservation est une alternative systémique, tenante de l'agro-écologie, en ce sens où elle vise à la fois à augmenter la production en mobilisant de nombreuses fonctions agro-écologiques des plantes de couverture et de la biomasse produite (Ranaivoson *et al.*, 2017), et à réduire les impacts négatifs de la mise en culture sur les sols en cessant de les perturber par le travail mécanique. Cette même appellation, agriculture de conservation ou système de culture sur couverture végétale, correspond à une grande

diversité de systèmes de culture aux performances variées. Sur les Hautes Terres, les résultats en termes de réduction de l'érosion sont tout à fait nets. Ainsi, une expérience menée de 2004 à 2009 a montré que les pertes moyennes par érosion en carbone, azote et phosphore dans les systèmes en labour étaient respectivement de 336, 26 et 7 kg/ha/an contre 6,35, 0,53 et 0,14 kg/ha/an dans un système en agriculture de conservation (Razafindramanana *et al.*, 2017).

Des résultats mitigés pour le rendement du riz pluvial

Un dispositif expérimental a été mis en place en 2004 à Andranomanelatra, sur les Hautes Terres (1 640 m), afin d'évaluer les performances en rendement grain et en production de biomasse de systèmes en agriculture de conservation, gérés en rotation biennale avec du riz pluvial. Ces systèmes ont évolué au cours du temps, comme le montre la figure 2.7.a, vers la production de plus de biomasse par la rotation du riz (nous avons retenu ici les systèmes proposés à base de maïs associé à une légumineuse). Les rendements en riz, inférieurs les premières années en système de culture sur couverture végétale par rapport au système comprenant le labour, sont devenus comparables à partir de la sixième année (fig. 2.7.b).

Biomasse produite hors grain (kg/ha)

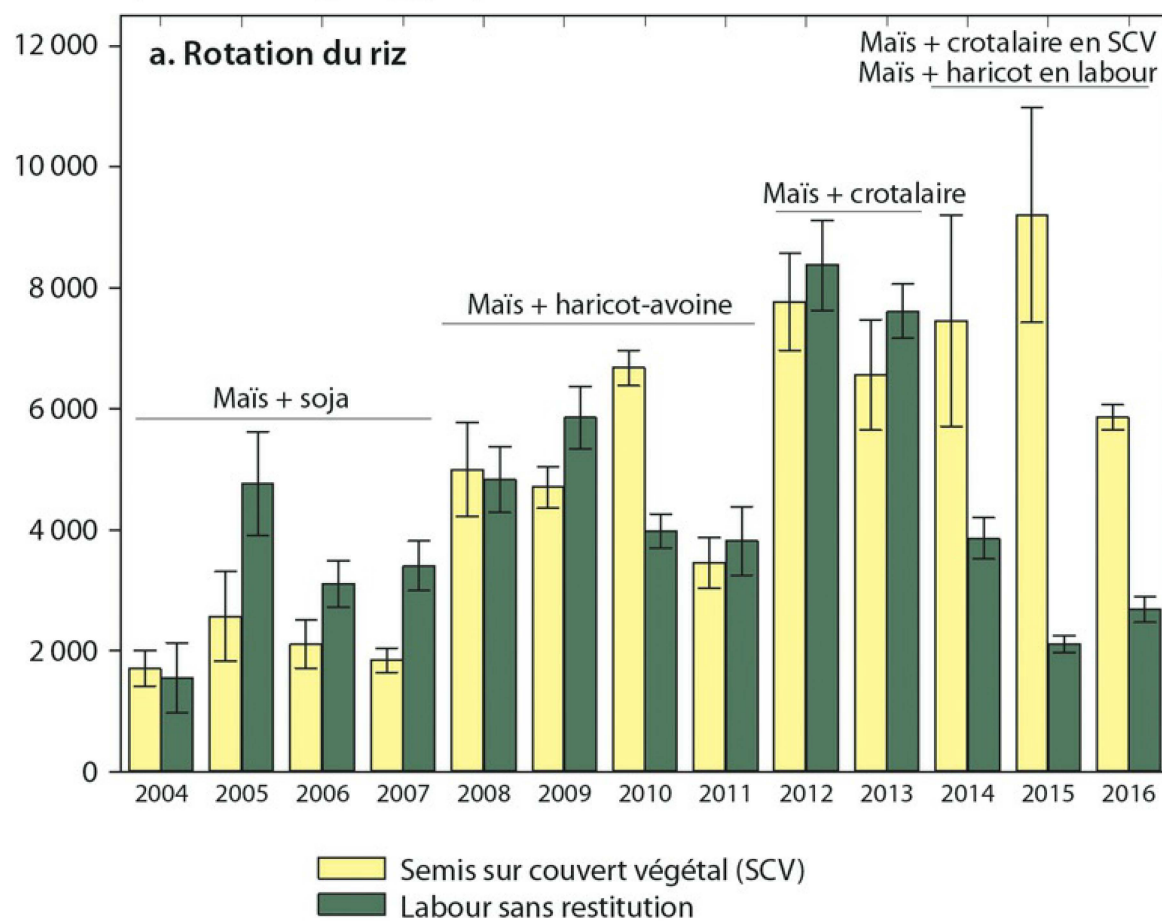


Figure 2.7.a. Évolution des productions en biomasse des cultures en rotation avec le riz pluvial sur le dispositif expérimental d'Andranomanelatra de 2004 à 2016 (données non publiées).

Rendement en riz (kg/ha)

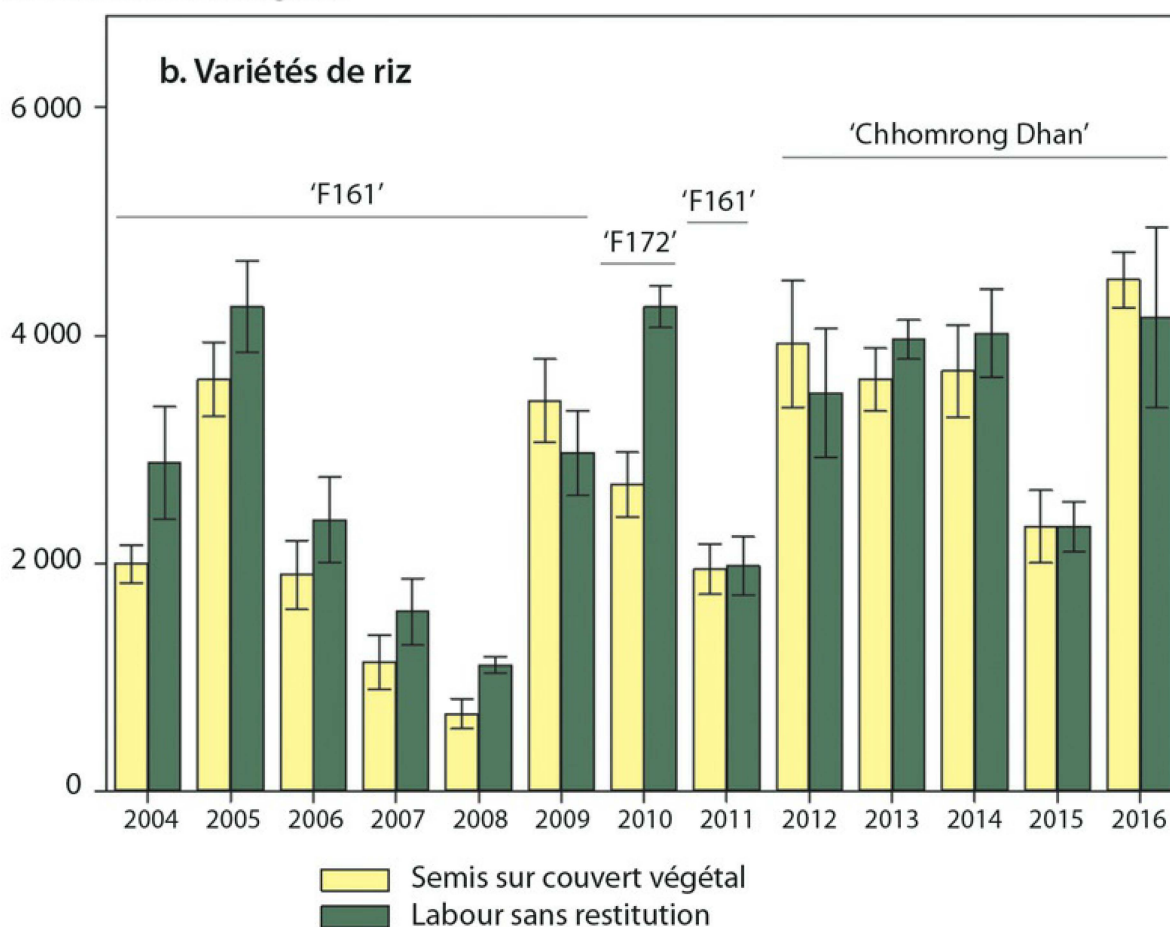


Figure 2.7.b. Évolution de la production de riz pluvial sur le dispositif expérimental d'Andranomanelatra de 2004 à 2016 (données non publiées).

Une étude plus précise sur certains systèmes (2005 à 2007) avait montré que l'établissement de la culture était plus difficile en agriculture de conservation, avec une croissance racinaire plus lente, et entraînait une réduction du développement du riz et de l'absorption de l'azote (Dusserre *et al.*, 2012). Pourtant dans les mêmes conditions, ces systèmes avaient montré leur capacité à fournir plus d'azote, mais celui-ci n'était pas valorisé par la culture (Rakotoarisoa *et al.*, 2010).

Des effets contradictoires sur la pyriculariose

La dynamique des épidémies de pyriculariose a été mesurée dans les systèmes en agriculture de conservation sur les Hautes Terres. En système conventionnel, les suivis ont permis de montrer que l'épidémie évolue plus

rapidement dès les premiers signes d'attaque foliaire. En agriculture de conservation, à la récolte, le pourcentage de grains vides à cause de la maladie est généralement plus faible, notamment grâce à une assimilation différente de l'azote (Dusserre *et al.*, 2017 ; Sester *et al.*, 2014). Cependant, la densité de peuplement du riz plus faible en agriculture de conservation qu'en système avec labour pourrait aussi être à l'origine de ces différences d'épidémie. En outre, les systèmes en agriculture de conservation préconisant de laisser les pailles de riz sur les parcelles sont peu compatibles avec des mesures de prévention en cas d'apparition de la maladie. Les travaux du Cirad et du Fofifa ont en effet montré que les pailles pouvaient servir de réservoir de spores de pyriculariose jusqu'à 18 mois après la récolte (Raveloson *et al.*, 2018). Ceci est un exemple de compromis auxquels font face les paysans dans la pratique de l'agro-écologie. La recherche doit s'attacher à mieux quantifier ces effets contradictoires pour donner les éléments de décision adéquats aux structures de développement, décideurs politiques et administratifs et paysans.

Une pratique encore peu adoptée sur les Hautes Terres

L'absence de résultats nets et rapides sur le rendement des cultures, la compétition pour les résidus, la haute technicité des systèmes en agriculture de conservation font que celle-ci n'est encore que très peu pratiquée par les agriculteurs des Hautes Terres (Hartog *et al.*, 2011 ; Randrianarison *et al.*, 2007). Si globalement le temps de travail est diminué en agriculture de conservation du fait de la suppression du labour manuel, cela ne suffit pas à contrebalancer d'autres problèmes techniques, et en particulier celui de l'efficacité des diverses plantes de couverture associées. En outre, la plupart des paysans n'ont pas la capacité de financement nécessaire à la mise en place de ces systèmes initialement très intensifs tels qu'ils ont été préconisés par leur promoteurs (Cavellier de Cuverville *et al.*, 2010). Le temps de retour sur investissement est souvent trop long.

L'analyse en cohortes (Randrianarison *et al.*, 2007) de la diffusion des techniques en agriculture de conservation autour de la station de Tafa a permis d'établir les principales raisons d'abandon :

- l'effet tampon de ces systèmes sur le bilan hydrique du sol n'est pas déterminant dans l'environnement des Hautes Terres ;

- les coûts de production relatifs à l'adoption de ces systèmes sont trop importants pendant la phase d'installation ;
- au-delà de la cinquième année d'adoption, les motifs d'abandon évoqués par les exploitants sont généralement d'ordre économique (une augmentation des rendements et de la marge brute par hectare non significative pour les producteurs et un faible retour sur investissement) et social (difficulté à gérer la vaine pâture et extrême difficulté à organiser les producteurs en associations ou coopératives).

Une étude plus large sur les zones d'intervention du projet « Bassins versants périmètres irrigués Sud-Est Hauts Plateaux » (BVPI/SE-HP) a montré les mêmes contraintes pour les mêmes effets (Hartog *et al.*, 2011), avec également une confiance éprouvée et ancienne dans l'efficacité du labour qui n'est pas remise en question par les effets attendus de l'agriculture de conservation en condition de non-labour. Ainsi, la majorité des paysans estiment les sols compactés après cinq ans d'agriculture de conservation. Les stratégies paysannes locales sont clairement orientées par des préoccupations de court terme avec la nécessité d'une autosuffisance alimentaire et une valorisation rapide des productions en cas d'excédents, alors que l'agriculture de conservation demande une gestion des moyens et une projection de la production à long terme. Il n'y a pas d'espace possible pour de la jachère améliorée non productive par exemple. Le froid en saison sèche, l'absence de plante de service localement adaptée et la non-augmentation des rendements (en l'absence d'utilisation d'engrais minéraux) ont clairement limité l'intérêt de l'agriculture de conservation. Les rares paysans ayant adopté les systèmes de celle-ci sont les plus aisés, pour lesquels les contraintes techniques ou sociales sont moins fortes (Hartog *et al.*, 2011). Ces faisceaux de contraintes sont similaires à ceux que l'on retrouve ailleurs en Afrique pour ce type de systèmes (Corbeels *et al.*, 2014).

De meilleurs résultats agronomiques dans le Moyen-Ouest

Plus récemment, des travaux ont été menés dans le Moyen-Ouest afin d'étudier plus précisément les dynamiques de l'azote dans le sol des systèmes de culture sur couverture végétale et l'impact de différents types de résidus de culture sur le riz. Premièrement, une expérimentation de courte durée sur la rotation riz pluvial / *Stylosanthes guianensis* a montré que, même si le *Stylosanthes* est capable de fixer de grandes quantités

d'azote atmosphérique et de produire une biomasse importante, la restitution finale en azote au riz était faible les premières années de culture (5 à 8 % de l'azote issu du *mulch* de *Stylosanthes* sont utilisés par le riz selon Zemek *et al.* [2018]). En revanche, sur un autre dispositif plus ancien, en milieu paysan sur deux années de systèmes à base de riz pluvial et de *Stylosanthes* âgés de quatre à dix années (fig. 2.8), les rendements en riz sont améliorés en systèmes de culture sur couverture végétale après une culture de *Stylosanthes* ; mais ce système en agriculture de conservation nécessite plus de travail, notamment au semis de par la présence d'une forte épaisseur de couverture sur le sol (8 t/ha MS en moyenne).

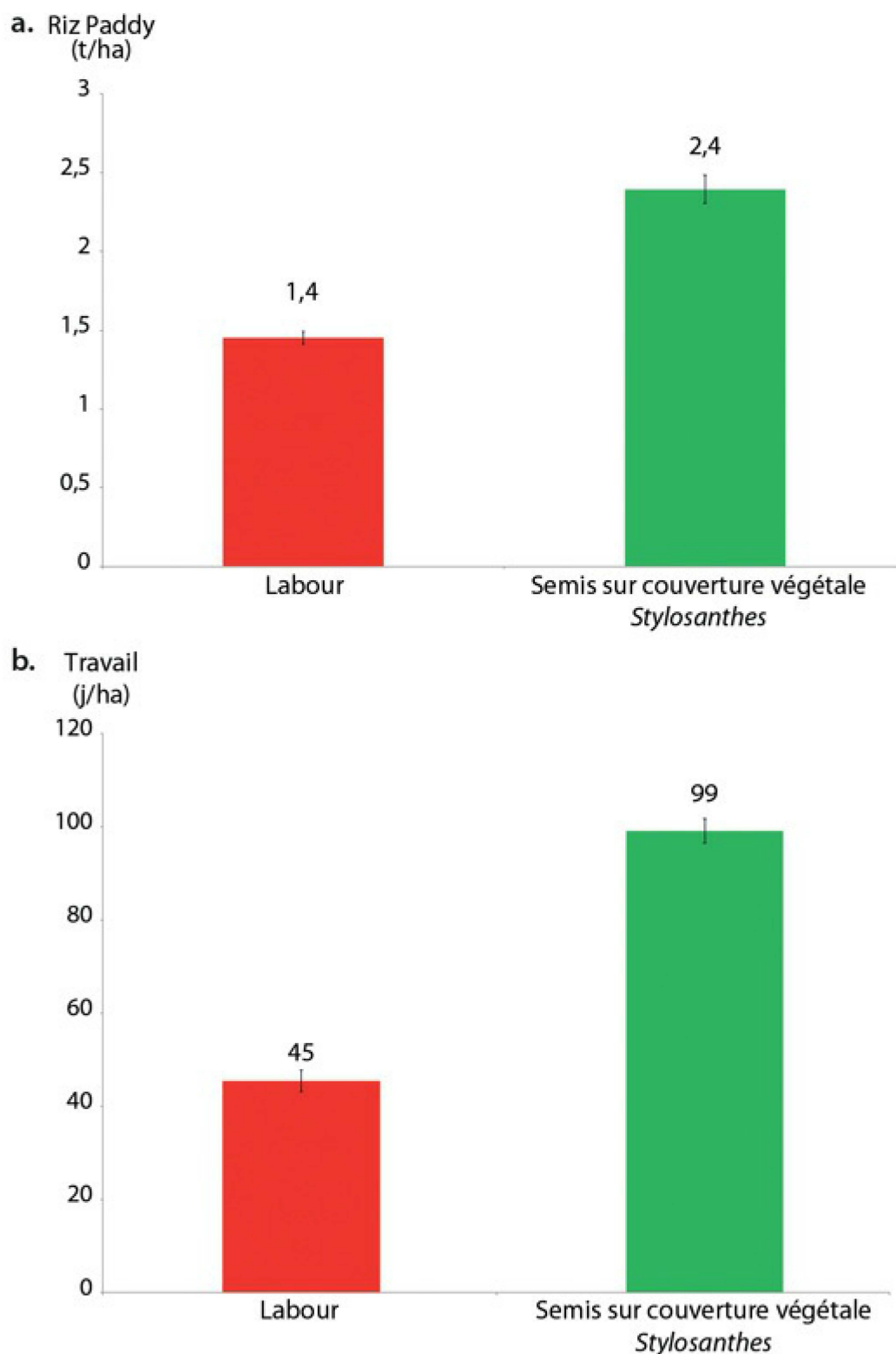


Figure 2.8. a : comparaison des rendements en milieu paysan pour une culture de riz sur labour (24 parcelles) ou en agriculture de conservation avec une couverture de *Stylosanthes guianensis* (19 parcelles), récoltes 2016 et 2017 (Autfray *et al.*, 2018).
 b : comparaison des temps de travail en milieu paysan pour une culture de riz sur labour (24 parcelles) ou en agriculture de

conservation avec une couverture de *Stylosanthes guianensis* (19 parcelles), récoltes 2016 et 2017 (Autfray *et al.*, 2018).

Alors que le *Stylosanthes* a été introduit pour sa capacité à coloniser rapidement des sols pauvres, il a aussi la capacité de maîtriser le striga, plante-parasite emblématique de cette région, sur les cultures de riz et de maïs. Sur la récolte 2015, chez sept agriculteurs partenaires, il a été montré que la variété 'B22', très appréciée mais très sensible au striga, avait le même niveau de rendement (1,8 t/ha en moyenne) que la variété 'Nerica4', nouvellement introduite et résistante au striga, quand elle était cultivée en rotation avec du *Stylosanthes*. En moyenne, sur un dispositif expérimental pendant quatre années consécutives sur labour, le taux d'infestation de 'B22' par rapport à 'Nerica4' est environ dix fois supérieur, engendrant des rendements plus faibles. Mais le taux d'infestation comparé sur la même période est réduit de 2,1 à 0,4 plants/m² avec un système incluant du *Stylosanthes* et de 3,4 à 0,3 plants/m² sur maïs (Randrianjafizanaka *et al.*, 2018).

Un début d'adoption dans le Moyen-Ouest

L'expérience historique de diffusion des systèmes de culture sur couverture végétale autour d'Ivory dans le moyen-ouest depuis 1998 montre que les paysans ont des difficultés à adopter durablement l'agriculture de conservation sans un appui continu de techniciens.

Deux études sur les communes d'Ankazomoriotra et Vinany, dans une zone de moyenne altitude (900 - 1 100 m) (Quiennec *et al.*, 2013 ; Sorèze, 2010), ont permis de caractériser les exploitations agricoles, d'identifier une typologie, de mesurer l'adoption des systèmes en agriculture de conservation (cinq ans après leur introduction), en fonction des types et de la taille des exploitations agricoles. Dans la zone de travail de l'opérateur de développement Fafiala, depuis 2005, les exploitants les plus modestes obtiennent, après adoption des systèmes en agriculture de conservation, un revenu agricole net inférieur à ce qu'il serait en système traditionnel. En revanche, les exploitants possédant une surface agricole moyenne à grande (supérieure à 5 ha) augmentent leurs surfaces cultivées grâce à l'adoption des systèmes en agriculture de conservation (du fait de la réduction du temps de jachère). Il en découle une augmentation de leur revenu agricole net. Au total, sur 1 318 ha suivis par le projet financé par l'AFD « Bassins

versants périmètres irrigués, Sud-Est, Hauts Plateaux » (BVPI-SE-HP), 450 ha étaient en agriculture de conservation en 2011 (Penot *et al.*, 2011). Les enquêtes ont aussi révélé que les systèmes en agriculture de conservation étaient efficaces contre les effets du striga, ce qui a permis de maintenir des rotations axées principalement sur les céréales. En revanche, les temps de travaux ont été significativement augmentés pour les systèmes à base de *Stylosanthes* spp. Les études de modélisation des revenus (Charentenay et Penot, 2012) ; ont montré un léger impact positif sur les revenus (entre 10 et 19 % de plus sur cinq ans) car l'effet de l'adoption de l'agriculture de conservation ne s'est fait sentir qu'à moyen terme avec la stabilisation des productions, sans une augmentation significative des rendements. Un tel changement de paradigme et de stratégie paysanne du court au moyen terme ne se fait pas en moins de six ans. Si l'agriculture de conservation reste pour l'instant problématique et peu adaptée pour les Hautes Terres dans un contexte foncier et social très particulier, dans le Moyen-Ouest, elle constitue en revanche une alternative potentielle de développement agricole durable, de par la diversité des systèmes proposés et la possibilité de maintenir une production de céréales malgré la présence du striga.

Quelles modifications l'agro-écologie induit-elle dans le travail de recherche ?

Le travail de longue date sur des solutions agro-écologiques a amené les chercheurs à travailler différemment notamment pour ce qui est des interactions avec les agriculteurs.

Sélection participative

La sélection participative consiste à associer plus étroitement les petits agriculteurs à la création, la sélection et la diffusion de matériel végétal et sous-entend un dialogue ou un échange permanent entre les agriculteurs et les chercheurs. Pour obtenir un meilleur ajustement des variétés de riz pluvial aux besoins des paysans, une partie du travail de sélection doit être réalisé chez eux et avec leur participation (photo 2.1). C'est d'autant plus important pour les exploitations agricoles peu intensifiées et donc particulièrement soumises à l'hétérogénéité des conditions environnementales. C'est pourquoi un réseau d'évaluation variétale

participative est mis en place chaque année en partenariat avec des acteurs qui ont beaucoup varié au cours du temps (organisations paysannes, ONG, projets, institutions de recherche ou de formation). Le programme de sélection du riz pluvial est d'ailleurs en train d'évoluer vers une plus grande implication des paysans en les associant plus en amont dans le processus de sélection, y compris dans les phases qui se déroulent sur les stations expérimentales. C'est par cette approche que quatre nouvelles lignées ont été identifiées comme plus performantes et plus appréciées que les témoins correspondant aux deux écologies ciblées.



Photo 2.1. Évaluation participative des nouvelles lignées de riz pluvial par des groupes de paysannes dans le Moyen-Ouest en 2015. L'approche participative permet par exemple de prendre en compte les préférences de choix liées au genre dans le processus de sélection. © Kirsten Vom Brocke / Cirad.

Plateforme d'innovation

Dans le moyen-ouest du Vakinankaratra, le projet de recherche Stradiv^[4] permet de tester de nouvelles démarches de conception participative de

systèmes de culture, en s'appuyant sur un lien permanent entre des activités réalisées sur des fermes de référence et celles du dispositif expérimental d'Ivory proche. Ce site intègre la sélection du riz pluvial, différentes expérimentations thématiques et un référentiel technique de formation du groupement du Semis direct à Madagascar. Sur les fermes de référence sont réalisés en permanence des diagnostics thématiques des contraintes et un suivi des performances des différentes parcelles. La sélection de systèmes innovants est d'abord entreprise avec un dispositif expérimental spécifique permettant une co-évaluation des chercheurs et des agriculteurs sur un grand nombre de modalités en bandes croisées (*strip-plot*). Dans un deuxième temps, les systèmes de culture sont mis en œuvre par des paysans dans des fermes de référence pour une évaluation économique et d'intégration à l'échelle de l'exploitation agricole. L'intérêt de cette démarche est d'associer les savoirs locaux et les connaissances scientifiques sur des pratiques et des modèles techniques, pour sélectionner plus rapidement les meilleurs agencements et modes de gestion de cultures, dans l'espace et le temps (Autfray *et al.*, 2018).

Évaluation à l'échelle de l'exploitation et gestion des compromis

Comme nous l'avons montré dans les exemples précédents, les agriculteurs peuvent être contraints de faire des compromis entre différents objectifs dans leurs pratiques agro-écologiques. Par exemple, garder les pailles de riz sur le sol peut aider à protéger le sol contre l'érosion mais en même temps va réduire la quantité de fumier de qualité produite et peut maintenir la pression des maladies fongiques. Il importe donc d'évaluer les options techniques sur leurs différentes facettes. Par exemple, Rasolofo (2017) a étudié la performance de trois systèmes de culture sur le plan de leur productivité, du potentiel de maintien de la teneur en carbone du sol et de la possibilité de valorisation de la biomasse aérienne comme ressource fourragère. La figure 2.9 montre l'impact de l'exportation hors de la parcelle de 0 à 100 % des résidus sur la production de lait possible grâce à ces résidus et la quantité d'azote retournant au sol par les résidus restants. On peut constater qu'il est possible d'augmenter sensiblement la production de lait sans grever fortement le retour d'azote à la parcelle par les résidus végétaux. En effet, une part des restitutions en azote provient des racines qui, de toute façon, seront laissées dans le sol même en cas d'exploitation totale de la biomasse aérienne. Les recommandations

devront s'adapter aux contraintes et objectifs des paysans en termes de production et de maintien de la fertilité, qui diffèrent suivant les types d'exploitations.

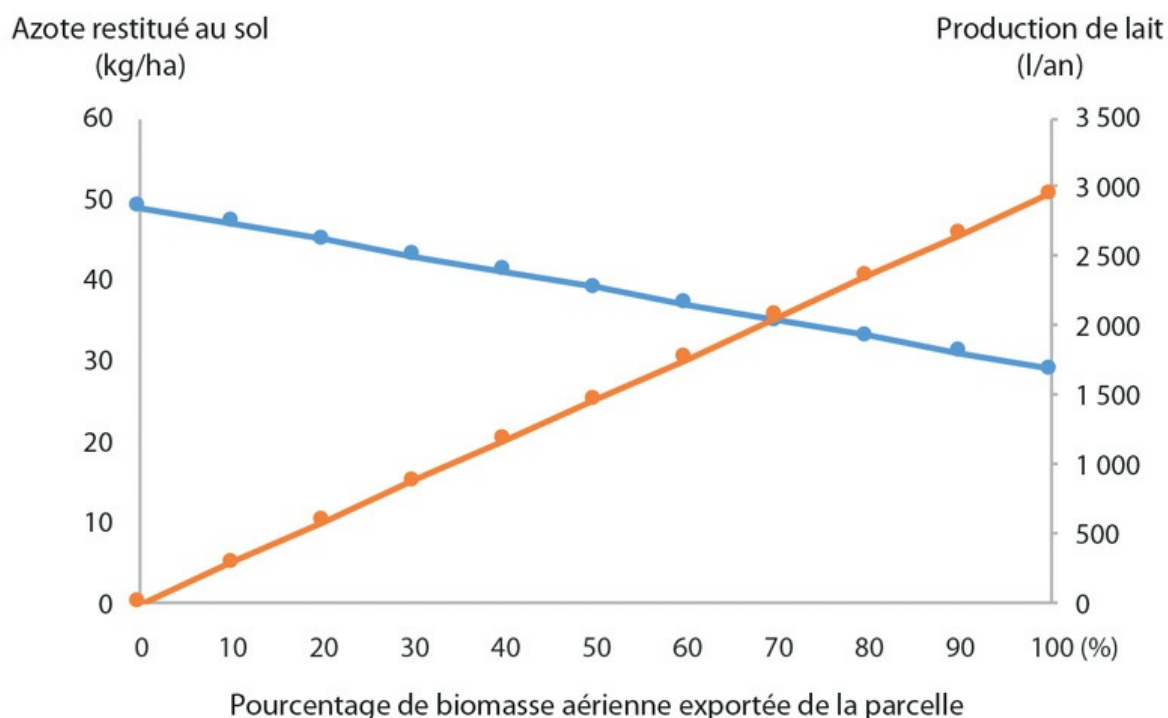


Figure 2.9. Simulation de la quantité d'azote des résidus de culture retournant au sol (axe gauche) et de la quantité de lait (axe droit) pouvant être produite, en utilisant de 0 à 100 % (x) de la biomasse végétative aérienne d'un système d'une rotation riz pluvial / maïs + haricot (Rasolofo, 2017).

Conclusion

Plus de vingt années de recherches et de développement sur l'agro-écologie dans le Vakinankaratra ont débouché sur des degrés variés d'adoption des innovations mises au point par les chercheurs avec les paysans. Il existe notamment des différences à l'intérieur de la région qui s'expliquent en partie par les performances des systèmes de culture, la pression sur les résidus, et les problèmes agronomiques, économiques et sociaux auxquels les agriculteurs font face.


La pratique de l'agriculture de conservation implique des modifications assez profondes, non seulement des systèmes de culture, mais également des systèmes de production : allocation des terres, répartitions du travail.

De plus, dans un contexte où les agriculteurs n'ont pas facilement accès à des référents techniques, l'adoption de ces nouveaux systèmes complexes représente un risque important d'échec technique. Ainsi, beaucoup d'agriculteurs dont les conditions économiques sont très précaires, sont réticents à modifier de manière drastique leur système de production à cause des risques que cela fait courir sur leur sécurité alimentaire et économique. Dans ce contexte, ce sont les innovations les plus simples et les moins risquées qui sont reprises en premier par les paysan(ne)s. Ainsi l'adoption de nouvelles variétés de riz pluvial importées ou sélectionnées localement a été très rapide. Ces variétés présentent l'avantage d'être très adaptées aux systèmes de cultures préexistants qui n'utilisent que peu ou pas d'engrais minéraux ni d'herbicide. Elles ont permis d'accroître la production en riz et de contribuer à la sécurité alimentaire de la région sans avoir à faire appel à des itinéraires techniques compliqués.


On n'a pas assisté pour l'instant à une refonte profonde des systèmes de production dans le Vakinankaratra sous l'impulsion des recherches menées en agro-écologie. Néanmoins, comme nous avons pu le voir, de par la création de nouveaux outils structurant les interactions avec les acteurs locaux dans une démarche participative, petit à petit, des composantes de « systèmes agro-écologiques » plus complexes sont adoptées : variétés, amélioration de l'efficacité du recyclage des nutriments, culture de plantes de service pour lutter contre le striga et/ou produire des fourrages... Les agriculteurs du Vakinankaratra bénéficient d'un panel d'options techniques qu'ils commencent à mettre à œuvre. On peut donc s'attendre à ce que l'intensification des systèmes de production devienne progressivement une réalité et qu'elle se fasse en mobilisant une part significative d'options écologiquement intensives et pas sur des solutions classiques d'intensification (intrants chimiques, mécanisation...) encore difficiles d'accès à bon nombre de petits producteurs de ces régions. Il faudra toutefois continuer à travailler avec les acteurs locaux à un accompagnement intense et efficient du processus d'innovation autour de ces alternatives.

Références


Andriarimalala J.H., Rakotozandriny J.N., Andriamandrosoa A.L.H., Penot E., Naudin K., Dugué P., Tillard E., Decruyenaere V., Salgado P., 2013. Creating synergies between conservation agriculture and cattle


production in crop-livestock farms: A study case in the Lake Alaotra Region of Madagascar. *Experimental Agriculture*, 49, 352-365, <https://doi.org/10.1017/S0014479713000112> .


Autfray P., Raharison T., Ripoché A., Audoin S., Salgado P., Rakotofiringa H., Moussa N., Randrianjafizanaka M.T., Rafenomanjato A., Rasambatra E., Rakotoarivelo M., 2018. Conception participative de systèmes de culture innovants dans le moyen-ouest du Vakinankaratra (MOV).

Breumier P., Ramarosandratana A., Ramanantsoanirina A., Vom Brocke K., Marquié C., Dabat M.H., Raboin L., 2018. Évaluation participative des impacts de la recherche sur le riz pluvial d'altitude à Madagascar de 1980 à 2015. *Cahiers agricoles*, 27, 15004, <https://doi.org/10.1051/cagri/2017065> .

Cavellier de Cuverville T., Wampfler B., Penot E., 2010. Analyse des pratiques de crédit dans la zone du projet BVPI-SEHP (Vakinankaratra et Moyen-Ouest), document de travail AFD/BVPI/SE-HP n° 27, CD-rom AFD/2011, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21149.36325> .

Corbeels M., de Graaff J., Ndah T.H., Penot E., Baudron F., Naudin K., Andrieu N., Chirat G., Schuler J., Nyagumbo I., Rusinamhodzi L., Traore K., Mzoba H.D., Adolwa I.S., 2014. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 155-170, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.011> .

de Charentenay J., Penot E., 2012. Évaluation socioéconomique de l'impact de l'adoption des techniques de semis sous couvert végétal sur le revenu des agriculteurs du moyen-ouest de Madagascar (région d'Ankazomiriotra), projet Rime-Pampa, document de travail AFD/BVPI/SE-HP n° 47, 2009, CD-rom AFD/2012, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12760.75521> .

Degenne P., Lo Seen D., 2016. Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs. *SoftwareX*, 5, 89-95, <https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.05.002> .

Dusserre J., Chopart J.-L., Douzet J.-M., Rakotoarisoa J., Scopel E., 2012. Upland rice production under conservation agriculture cropping systems in

cold conditions of tropical highlands. *Field Crops Research*, 138, 33-41, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.011> ☐.

Dusserre J., Raveloson H., Michellon R., Gozé E., Auzoux S., Sester M., 2017. Conservation agriculture cropping systems reduce blast disease in upland rice by affecting plant nitrogen nutrition. *Field Crops Research*, 204, 208-221, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.024> ☐.

Griffon M., 2013. *Qu'est-ce qu'une agriculture écologiquement intensive ?* Quæ, Versailles, 224 p.

Hartog M., Penot E., De Graff J., Raharison T., 2011. Implementation of conservation agriculture in the highlands of Vakinankaratra, Madagascar: Constraints and opportunities, document de travail, projet CA2AFRICA 2011, Antananarivo, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21988.22400> ☐.


Husson O. (ed.), Séguy L. (ed.), Charpentier H. (ed.), Rakotondramanana (ed.), Michellon P., Raharison T., Naudin K., Enjalric F., Moussa N., Razanamparany C., Rasolomanjaka J., Bouzinac S., Chabanne A., Boulakia S., Tivet F., Chabierski S., Razafintsalama H., Rakotoarinivo C., Andrianasolo H.M., Chabaud F.X., Rakotondralambo T., Rakotondralambo P., Ramaroson I., 2013. *Manuel pratique du semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) : Application à Madagascar*, GSDM / Cirad, Antananarivo, Madagascar, 716 p.


Ou S.H., 1985. *Rice Diseases*, 2^e édit., Commonwealth Mycological Institute, Kew, Royaume-Uni, 380 p.

Pennisi E., 2010. Armed and dangerous. *Science*, 327, 804-805, <https://doi.org/10.1126/science.327.5967.804> ☐.


Penot E., Raboin L.-M., Tokarski Y., Rakotofiringa A., Bodoy A., Ahmim Richard A., Dabat M., Rahahison T., Rakoto Harivony A., Razafimandimby S., 2016. Rôle et place du riz pluvial dans les exploitations du Vakinankaratra (Hauts Plateaux et Moyen-Ouest). In : *Processus d'innovation et résilience des exploitations agricoles à Madagascar* (E. Penot, ed.), L'Harmattan, Paris, 410.


Penot E., Sorèse J., Raharison T., 2011. Analyse de la situation des superficies en SCV dans le Moyen-Ouest avec l'opérateur Fafiala (projet BVPI-SE/HP), synthèse pour le projet Pampa, document de travail


AFD/BVPI/SE-HP n° 17, CD-rom AFD, 2012, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26182.52802> .

Quiennec, M., Penot, E., Razafimahatratra Hanitriniaina, M., 2013. Caractérisation et typologie des exploitations agricoles du moyen-ouest du Vakinankaratra, Madagascar, document de travail UMR/Innovation/SPAD, 2013, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19471.64167> .


Rabenandro T., Dupin B., Hyac P., 2009. *Guide synthétique d'agronomie et d'agro-écologie dans le contexte de la rive-ouest du lac Alaotra*, AVSF, 47 p.

Raboin L.-M., Ramanantsoanirina A., Dusserre J., Razasolofonahary F., Tharreau D., Lannou C., Sester M., 2012. Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem. *Plant Pathology*, 61 (6), 1103-1111, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2012.02602.x> .


Raboin L.-M., Randriambololona T., Radanielina T., Ramanantsoanirina A., Ahmadi N., Dusserre J., 2014. Upland rice varieties for smallholder farming in the cold conditions in Madagascar's tropical highlands. *Field Crops Research*, 169, 11-20, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.09.006> .

Raboin L., Dzido J., Ahmadi N., 2013. Création variétale pour la riziculture pluviale d'altitude à Madagascar: Bilan de 25 années de sélection. *Cahiers agricultures*, 22, 450-458, <https://doi.org/10.1684/agr.2013.0624> .

Rakotoarisoa J., Oliver R., Dusserre J., Muller B., Douzet J.-M., Michellon R., Moussa N., Razafinjara L.A., Rajeriarison J., Scopel E., 2010. Bilan de l'azote minéral au cours du cycle du riz pluvial sous systèmes de couverture végétale en sol ferrallitique argileux à Madagascar. *Étude et gestion des sols*, 17, 169-186.

Ranaivoson L., Naudin K., Ripoche A., Affholder F., Rabeharisoa L., Corbeels M., 2017. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 26, <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0432-z> .


Randrianarison N., Penot E., Poncet C., 2007. Suivi et analyse des succès

et des abandons des systèmes à base de semis direct sous couverture végétale (SCV) : Mise au point de la méthodologie, Cas du fokontany d'Antsapanimahazo – Madagascar, document de travail AFD/BVPI/SE-HP n° 33, CD-rom AFD, 2008, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32893.41448> .

Randrianjafizanaka M.T., Autfray P., Andrianaivo A.P., Ramonta I.R., Rodenburg J., 2018. Combined effects of cover crops, mulch, zero-tillage and resistant varieties on *Striga asiatica* (L.). *Agriculture, Ecosystems and Environment, under fina*.

Rasolofo L.I., 2017. Impact des innovations agro sur les flux de carbone et cultures pluviales : Cas des Hautes Terres de Madagascar, thèse de doctorat de l'université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar, 161 p.

Raveloson H., Rafenomanjato A., Ramanantsoanirina A., Sester M., Raboin L., 2016. Gestion de la diversité variétale du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose. In : *Recherche interdisciplinaire pour le développement durable et la biodiversité des espaces ruraux malgaches : Application à différentes thématiques de territoire* (D. Hervé, R.-A. Tantely, R. Jacqueline, R. Bruno, eds), SCAC/Parrur, Éditions MYE, Antananarivo, Madagascar, 137-167.

Raveloson H., Ratsimiala Ramonta I., Tharreau D., Sester M., 2018. Long-term survival of blast pathogen in infected rice residues as major source of primary inoculum in high altitude upland ecology. *Plant Pathology*, 67 (3), 610-618, <https://doi.org/10.1111/ppa.12790> .


Razafindramanana N.C., Marie J., Albrecht A., 2017. Effet des systèmes de culture en semis direct pour contrôler les pertes en carbone, azote et phosphore totaux par érosion hydrique sur les Hautes Terres de Madagascar. *Afrique Science*, 13, 341-353.


Salgado P., Rarivoarimanana B., Andriarimalala J., Nabeneza S., Tillard E., Decruyenaere V., Lecomte P., 2012. Pratiques paysannes et qualité fertilisante du fumier dans la région du Vakinankaratra et d'Amoron'i Mania, fiche technique.


Salgado P., Tillard E., Rarivoarimanana B., Decruyenaere V., Lecomte P., 2014. Management practices to conserve the fertilizer N value of dairy manure in Vakinankaratra region, Madagascar. In : *Agroecology for*

Africa, International Conference, Antananarivo, Madagascar.

Sester M., Raveloson H., Degenne P., 2016. Modelling the impacts of varietal diversity and cropping system on the propagation of rice blast at the landscape level: Model construction. *In : Rice Blast Conference, Manille, Philippines.*

Sester M., Raveloson H., Tharreau D., Dusserre J., 2014. Conservation agriculture cropping system to limit blast disease in upland rainfed rice. *Plant Pathology*, 63, 373-381, <https://doi.org/10.1111/ppa.12099> .

Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A., Peigné J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 1-20, <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7> .

Zemek O., Frossard E., Scopel E., Oberson A., 2018. The contribution of *Stylosanthes guianensis* to the nitrogen cycle in a low input legume-rice rotation under conservation agriculture. *Plant and Soil*, 45 (1-2), 553-576, <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3602-0> .

CHAPITRE 3

L'agroforesterie : des pratiques diversifiées pour la transition agro-écologique de la cacaoculture africaine

Patrick Jagoret, François Ruf, Christophe Du Castel, Jean-Michel Harmand, Sylvain Raffleau, Stéphane Saj, Didier Snoeck, Thomas Wibaux

Depuis les années 1960, la culture du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Afrique a connu un essor sans précédent. Le verger cacaoyer africain, qui couvrait 3,3 millions d'hectares en 1961, en représente aujourd'hui 6,5 millions. Dans le même temps, la production africaine de cacao est